

doi: 10.11720/wtyht.2024.1545

姚文, 郭军, 孙崇波, 等. 四川石棉大渡河地区金矿带基于 AMT 的地质—地球物理找矿模型[J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1247–1257. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1545>

Yao W, Guo J, Sun C B, et al. AMT-based geological-geophysical prospecting model for the gold ore zone in the Daduhe area, Shimian County, Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1247–1257. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1545>

四川石棉大渡河地区金矿带基于 AMT 的地质—地球物理找矿模型

姚文, 郭军, 孙崇波, 周洪兵, 张洪超
(四川省金属地质调查研究所, 四川 成都 611730)

摘要: 四川石棉大渡河地区金矿带位于松潘—甘孜造山带南段稀有金属、贵金属和有色多金属成矿带, 区内构造复杂, 地形陡峻, 严重制约找矿勘查的实践运用。本文总结区域成矿地质背景和条件、地球物理特征, 以石棉县保坪金矿为典型矿区, 开展以音频大地电磁测深(AMT)为核心的地球物理深部勘查工作, 圈出 3 个低电阻率异常体 M1、M2 和 M3, 与矿化蚀变带 I 号、金矿化带 III 号和金铜矿体具有对应性, 说明地球物理方法深部找矿具备有效性和适用性。结合地质认识和工程手段验证成果, 总结典型矿区地质和地球物理找矿标志, 建立适用于地区金矿带的地质—地球物理找矿模型, 为地区深部找矿提供技术支撑。

关键词: 石棉; 金矿带; 地球物理; 找矿模型

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)05-1247-11

0 引言

四川石棉大渡河金矿带属康滇地轴北段稀有金属、贵金属和有色多金属成矿带, 是西南地区重要的金成矿集中带^[1-3]。具有得天独厚的地质成矿背景和条件, 至今当地地质构造活动仍然活跃^[4-5]。区内地质情况复杂, 交通条件困难, 地形地貌陡峭, 传统的固体矿产勘查方法和手段费时费力成本高, 亟需为区内的深部找矿提供技术支撑。

近年来, 地质—地球物理找矿技术研究在多金属矿勘查中广泛进行开展^[6-9], 众多实践成果为项目工作思路提供启示^[10-12]。为解决深部找矿问题, 关键在于勘查技术的有效、高效和合理应用^[13-14]。本文总结区域成矿地质背景及地质条件, 归纳石棉县保坪金矿典型矿区地质背景及成矿条件, 开展并优化音频大地电磁测深工作成果, 依据地质和地球物理找矿标志, 建立地质—地球物理找矿模型, 评

述基于地球物理勘查方法的矿产勘查有效性和适用性。

1 地质背景及成矿条件

1.1 区域地质背景及地质条件

石棉大渡河金矿带位于羌塘—三江造山系(V)与扬子陆块(VIII)两大一级构造单元结合部位^[15-17], 横跨玉龙塔格—巴颜喀拉前陆盆地(VI)、上扬子陆块(VIII)两个二级构造单元(图1)。整体上经历元古宙陆块裂解, 古生代洋盆多次闭合及拉分, 早中生代微陆块拼贴, 晚三叠世由被动陆缘板块俯冲碰撞, 至新生代转为陆内碰撞造山的地质演化过程^[18], 最终形成现今由区域深大断裂夹持, 不同构造叠置, 多旋回碳酸盐岩、陆源碎屑岩及火山岩建造沉积叠覆, 多级断裂构造控岩控矿的复杂地质构造格架。

区域地层主要有: 侏罗系下统白果湾组(J_1bg)、三叠系上统须家河组(T_3x)、三叠系下统(T_1)、二

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2024-03-02

基金项目: 四川省石棉大渡河地区金多金属矿深部找矿关键技术研究项目(SDDY-Z2022017)

第一作者: 姚文(1989-), 男, 2016 年硕士毕业于成都理工大学, 主要从事地球物理勘查应用与研究工作。Email: 427838589@qq.com

通讯作者: 郭军(1988-), 男, 2012 年本科毕业于桂林理工大学, 主要从事地球物理矿产勘查工作。Email: 327882438@qq.com

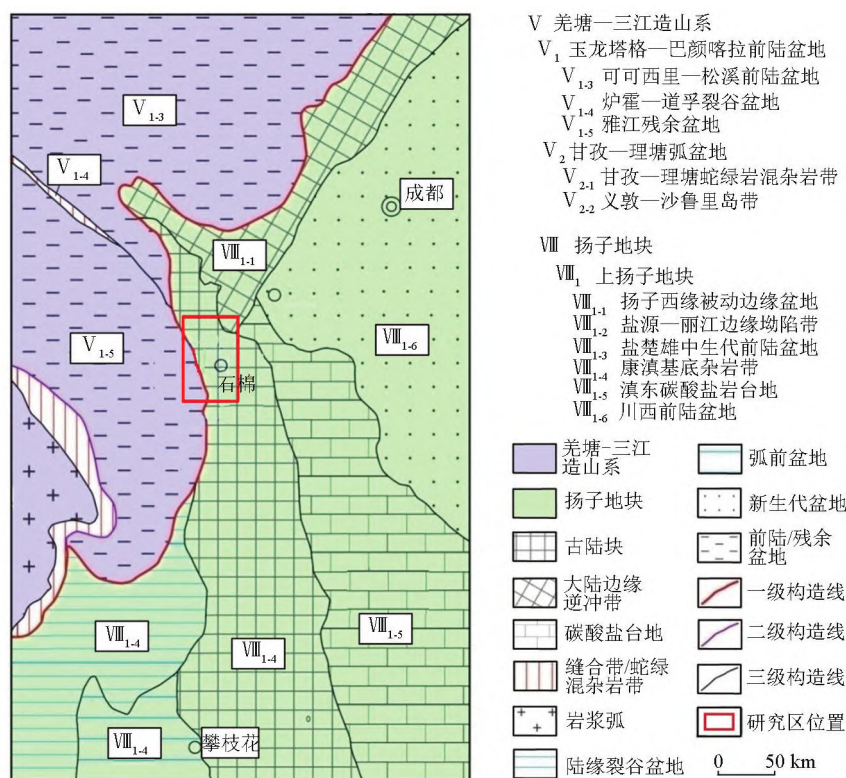


图 1 研究区大地构造位置

Fig.1 Geotectonic location of the study area

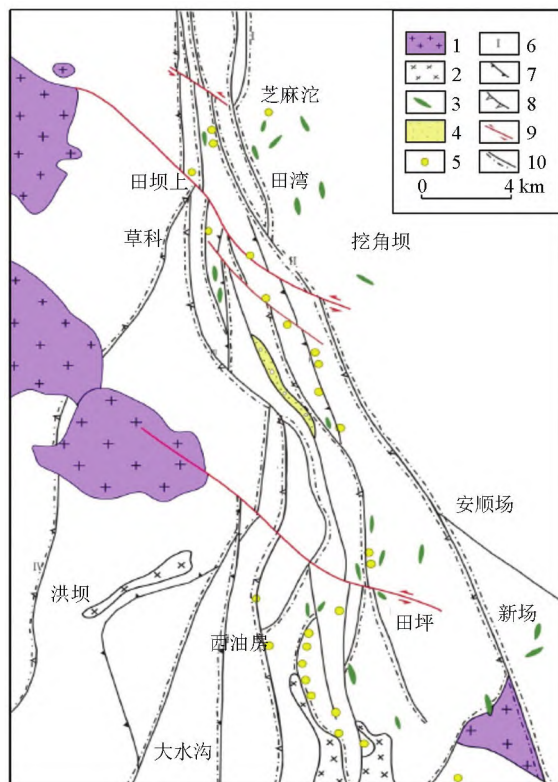


图 2 石棉大渡河地区地质简图

Fig.2 Geological schematic map of Dadu River in Shimian area

叠系上统(P_2)、二叠系下统(P_1)、泥盆系中统(D_2)和震旦系下统苏雄组 Zas 、开建桥组(Zak)等; 区域内岩浆岩主要为: 早震旦世—闪长岩类(δo_2^2)、早震旦世—花岗岩(γ_2^2)和花岗斑岩($\gamma \pi_2^2$)、二叠纪—斜长花岗混合岩(γo_5^2)和三叠纪—闪长岩类(δo_5^1)。

早震旦世的岩浆活动规模空前巨大, 形成 SN 向的石棉—孟获城巨大花岗岩岩基和其他若干中小岩体, 还有大量的火山喷发, 形成巨厚的火山岩; 三叠纪的岩浆活动较为强烈, 产生沿 SN 向构造带侵入的花岗岩, 以及较大范围的混合岩。

石棉大渡河地区金矿主要产于上震旦统与泥盆系之间及内部的次级顺层剪切带中^[19-20], 呈 SN 向狭长向南撒开的带状展布(图 2), 属于“盖层沉积岩中的金矿”, 分为 2 个类型: ①碳酸盐岩中石英脉型金矿; ②浅变质碎屑岩中石英脉型金矿。大渡河流域不同赋矿层位中普遍出露的基性岩脉(体)对成矿具有以下两方面贡献^[21]: ①提供流体运移通道; ②提供成矿的地球化学界面。广泛的深部来源的流体与大气降水来源的混合作用^[22], 在有利的构造部位产生一系列金矿的矿化。

1.2 典型矿区地质背景及地质条件

以四川省石棉县保坪金矿作为地球物理勘查技术示范的典型矿区, 矿区位于松潘—甘孜地槽褶皱系巴颜喀拉地槽褶皱带的九龙地背斜东部, 西油

房—地宝洞深大断裂东侧大岩房背斜西翼^[11]。深大断裂的长期活动, 次生构造发育, 形成断层纵横交错, 地层陡倾倒转的复杂构造格局。矿区夹持于金河—箐河断裂与安宁河断裂之间(图 3), 地层总体为走向 NE 的单斜层, 主要为断层构造。断层破碎带整体为近 SN 走向, 是区域主体构造带, 局部出现被其他走向断层切割的现象。

出露地层由老至新有: 震旦系灯影组(Z_d)、泥盆系棒达组($D_{2-3}b$)、泥盆系河心组($D_{2-3}h$)、二叠系铜陵沟组(P_1t)和第四系(Q)。矿区内岩浆岩较发育, 喷出岩未见, 侵入岩岩脉为中—晚二叠世辉绿岩, 西部存在辉绿岩脉侵入接触蚀变带, 宽度 10~34 m, 走向近 SN, 蚀变主要为强褐铁矿化、硅化、孔雀石化、蓝铜矿化、黄铁矿化、绿泥石化及高岭土化。矿区变质岩主要有板岩、千枚岩、变质砂岩以及大理岩等。

矿区成矿与地层、构造、岩浆岩和变质作用相关^[23-26]。岩性之间存在薄弱带, 尤其变质岩屑砂岩沉积层、炭质板岩与白云质灰岩沉积层, 受到后期应力作用发生层间滑动或断裂。近 SN 走向的断层破碎带是主要含矿、控矿构造。矿区西部密集分布的侵入的辉绿岩岩脉, 为深源岩浆岩, 为成矿提供物质来源和热源, 接触蚀变带内发现金、铜矿化体。接触交代变质作用及动力变质作用过程中, 引起温度和压力的变化, 起到矿物质的形成或集中。

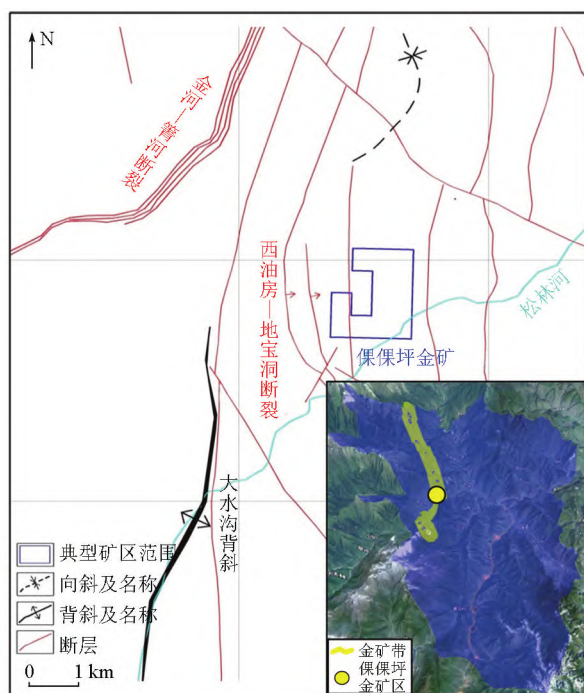


图 3 栗栗坪典型矿区构造纲要

Fig.3 Structure rigid diagram of Luoluoping typical orefield

2 地球物理特征

2.1 区域地球物理特征

1) 重磁异常特征: 区域布格重力异常总趋势是负异常为主^[27], 东侧石棉县一带为 $-245 \sim -280$ mGal; 北西侧丹巴一带为 -370 mGal; 在康定一带形成一条走向近 SN, 北侧偏东的陡梯度带, 映示其下部地壳变陡和存在深断裂系统, 显示为扬子陆块和松潘—甘孜造山带的分界线。区航磁异常的特点以康定与泸定之间为界^[28], ΔT 化极垂向一阶导数异常以负异常为主, 南侧形成走向为 NW 的带状正异常, 其强度高达 150 nT, 显示出扬子陆块西缘隆起的褶皱基底。NW 向带状正异常两侧的密集带, 显示出两组 NW 向大断裂带的位置, 北部大片负磁场区显示古特提斯构造域的沉积盖层区。

2) 大地电磁特征: 分布着巨厚的高阻体^[29], 向下延伸甚至超过 25 km; 鲜水河断裂带显示为在地壳深 11~37 km 处, 存在低阻层, 其电阻率为几至几十欧姆·米, 与地壳内低速度层大致吻合, 由花岗岩类物质部分熔融所致^[30]。

3) 岩石物性特征: 石棉大渡河地区内采集总计 13 种地质单元, 共计 497 块岩石标本, 分别测定 4 种物性参数, 密度(g/cm^3)、磁化率(SI)、极化率(mV/V)和电阻率($\Omega \cdot m$), 各岩性标本表现出不同的地球物理物性特征, 地层以地层代号表示, 数值为算术平均值(图 4)。

区域岩石物性特征为: ①密度参数特征: 侏罗系和三叠系中的页岩、砂岩和砾岩为低密度; 二叠系炭质板岩和变质砂岩、三叠系的变质砂岩为高密度; 其他岩性为中密度。②磁化率参数特征: 页岩、砂岩和大理岩等为低磁化; 岩层内的岩浆岩岩体(除二叠纪花岗岩混合岩类的斜长花岗岩外)为高磁化; 其他岩性为中磁化。③电阻率参数特征: 泥盆系的大理岩、二叠系的变质砂岩、早震旦世中混染杂岩体的闪长岩类、二叠系的斜长花岗岩呈现明显高电阻; 侏罗系和三叠系中的页岩、砂岩和砾岩呈现明显低电阻; 其他岩性为中电阻。④极化率参数特征: 二叠系和三叠系变质砂岩呈现高极化; 其他岩性为低极化。

2.2 矿区地球物理特征

典型矿区内测定岩石标本共 217 块, 标本岩性 7 类, 分别为白云质灰岩、微晶灰岩、炭质板岩、绢云母板岩、辉绿岩、金多金属矿矿石和变质岩屑砂岩。

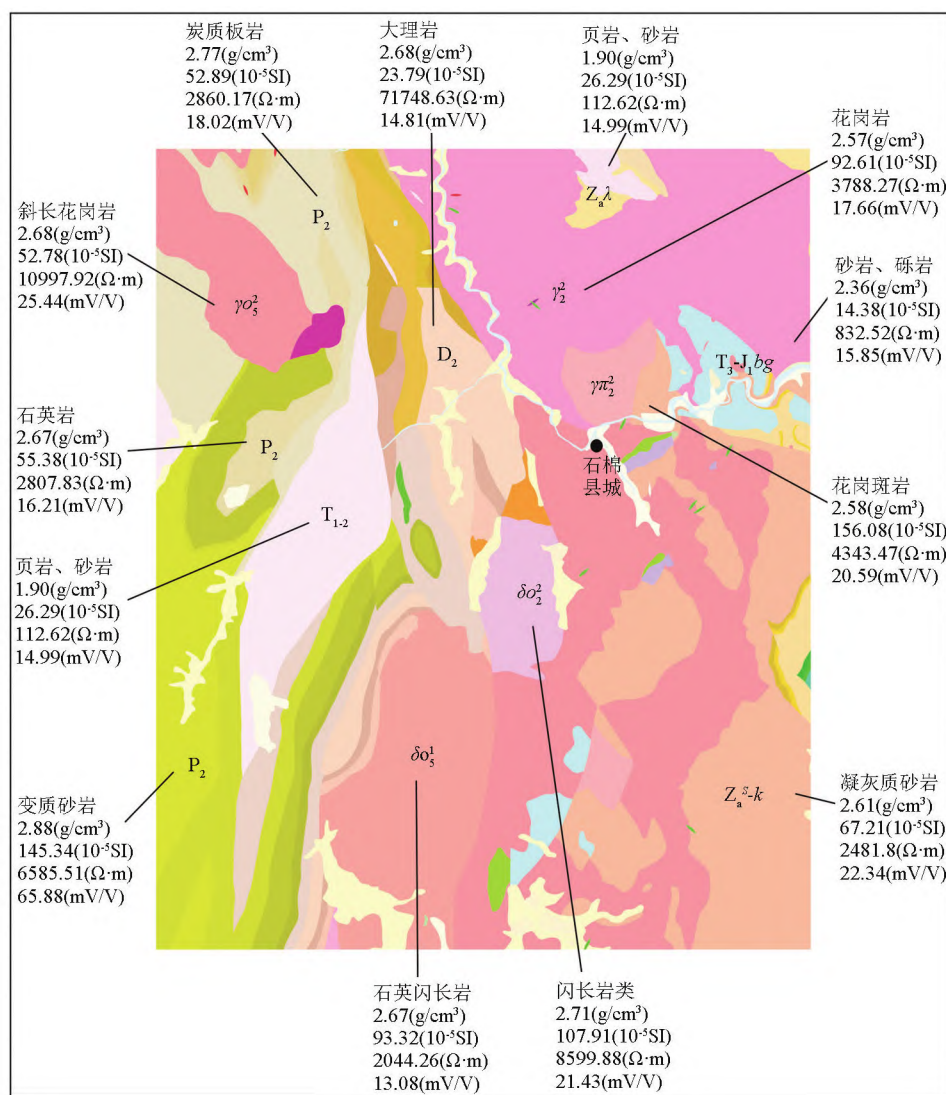


图 4 区域物性成果平面

Fig.4 Regional physical property results plan

岩性表现明显的物性差异(表1),是典型矿区开展地球物理勘查技术的前提和基础。白云质灰岩和微晶灰岩呈现绝对的高阻;变质岩屑砂岩、绢云母板岩和辉绿岩表现为明显的中阻;金多金属矿矿石和炭质板岩表现为低阻。

表 1 电性参数测定结果统计

Table 1 Statistical table of electrical parameters

岩性	标本数量/块	电阻率/($\Omega \cdot m$)			电阻特性
		最小值	最大值	算术平均值	
白云质灰岩	31	3062.5	340071.9	39320.81	高阻
微晶灰岩	32	3612.16	382537	59746.91	高阻
变质岩屑砂岩	30	2382.35	6745.45	4665.61	中阻
绢云母板岩	31	2021.15	8334.22	5778.55	中阻
辉绿岩	32	769.28	7485.58	3403.02	中阻
金多金属矿矿石	30	85.93	2369.44	1351.4	低阻
炭质板岩	31	0.39	1021.5	53.56	低阻

3 典型矿区地球物理勘查示范

石棉县平均坡度大于 33.78° ,属于全国坡度划分最高的地区之一,区域地形特征:高陡险,沟谷纵横,悬崖叠出,地形陡峻,严重制约大部分地质勘查方法和手段的实践运用。典型矿区内优选音频大地电磁测深(AMT)勘查方法^[31-34],完成测线5条,测线L7、L8、L23、L24和L32,奥维软件视角下3D模式,正北方,视角高度为3308m,俯视角角度 60° (图5)。

野外布设AMT剖面线5条,方位 90° ,点距20m,共99个测点,测线均垂直矿区地层及矿体走向。数据采集为张量模式数据,采集相互垂直的两对电场 E_x 、 E_y 和垂直方向的磁场分量 H_x 、 H_y 。使用设备为Geode EM3D电磁勘探系统,施工前试验确定

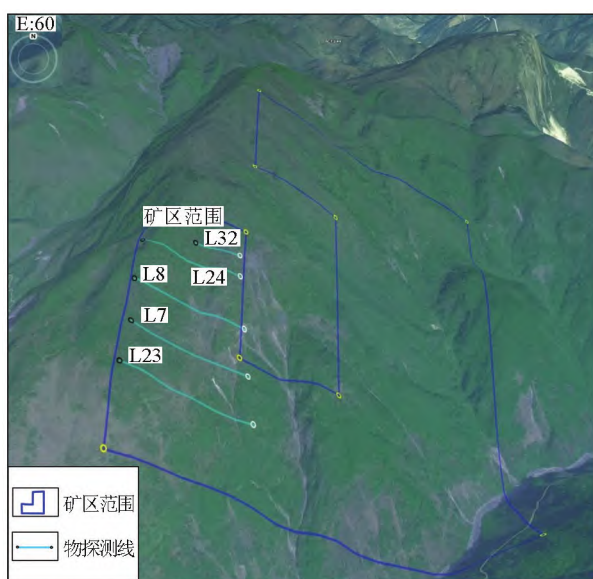


图5 矿区地形图及物探测线

Fig.5 Topographic map of typical mining area and geophysical exploratory line

采集参数,全区所有测点采集相同的频率范围,有效观测记录频带为 2.5~19 983.3 Hz;保证测量 48 kHz (20~1 000 Hz) 叠加次数 50 次以上,3 kHz (1 000~2 Hz) 叠加次数 10 次以上,多次叠加减少和弱化电磁干扰影响,保障观测资料的质量。反演采用一维 OCCAM 与二维 NLCC 联合反演,其结果同时具有一

维反演的稳定收敛性与二维反演的低拟合差特征;反演深度 600 m,反演成果图网格化参数为 20 m×20 m。

通过解释推断,矿区内圈出 3 个低电阻率异常体并进行工程验证,得到较好的找矿效果。圈定原则为:①以各测线电阻率—深度反演剖面反映的低于 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下的主要低阻异常区,与已知地质认识矿化蚀变带和金矿化带对应性强,控制异常体轴向上的形态;②中间区域横切面积不得大于相邻较大低阻异常区面积;③异常体端部外推长度,不大于测线线距 160 m 的 1/4;④异常体体积估算,参照固体矿产资源量估算中的断面法。

电阻率反演剖面划分出 3 个低阻异常体 M1、M2 和 M3: 低阻异常体 M1 包含低阻异常区 M1-1、M1-2、M1-3 和 M1-4; 低阻异常体 M2 包含低阻异常区 M2-1、M2-2 和 M2-3; 低阻异常体 M3 包含低阻异常区 M3-1、M3-2、M3-3 和 M3-4; 各测线反演剖面圈画的低阻异常区分布情况如图 6 所示。

3.1 低阻异常体 M1

位于典型矿区西部,低阻异体 M1 由 4 个测深剖面(L24、L8、L7 和 L23)的低阻异常区域圈定(图 6、图 7 和图 8),异常体轴向约 420 m,宽度 10~50 m,深度 190~310 m,异常区体积约为 $4.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,电阻

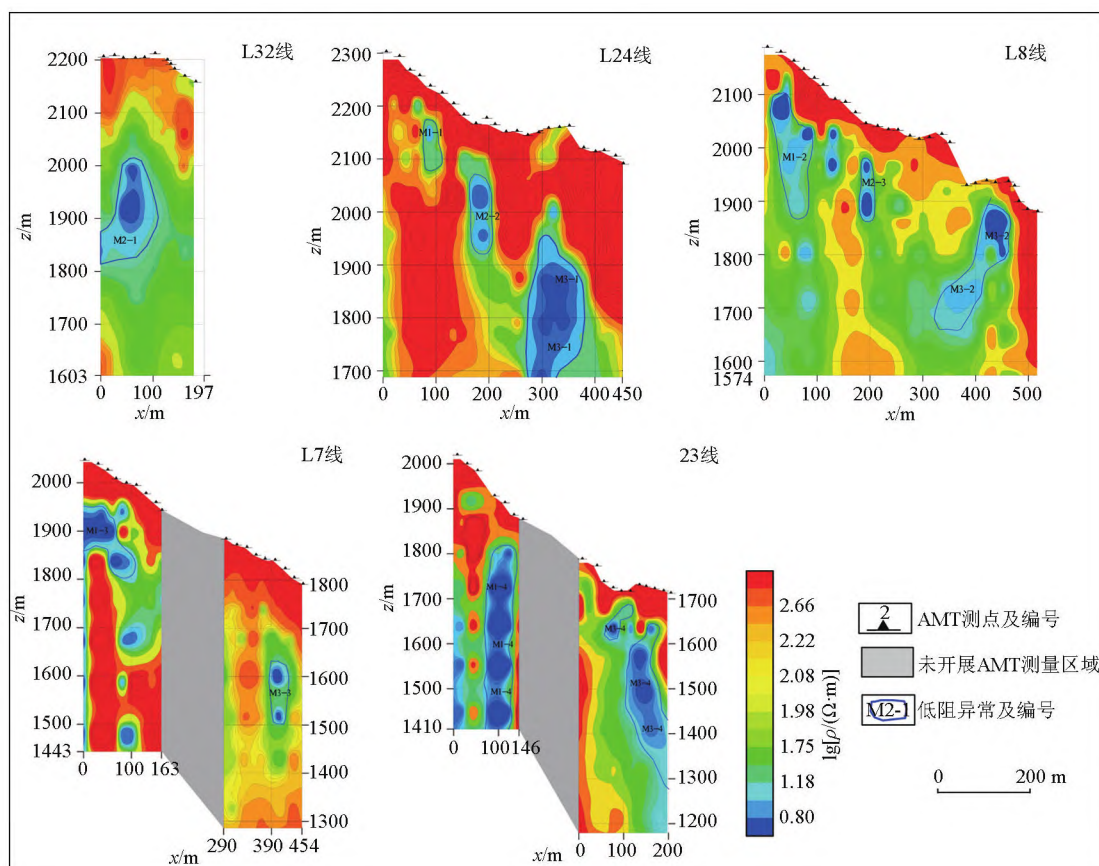


图6 各测线电阻率—深度反演剖面

Fig.6 Resistivity-depth inversion profiles

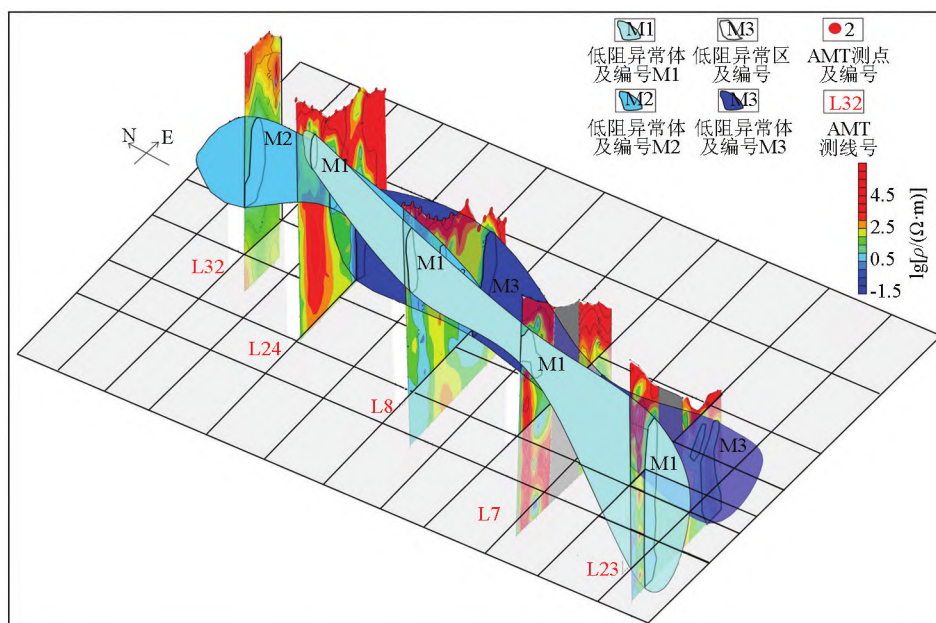


图 7 AMT 低阻异常体综合立体图

Fig.7 Comprehensive stereogram of AMT low resistance anomalous body

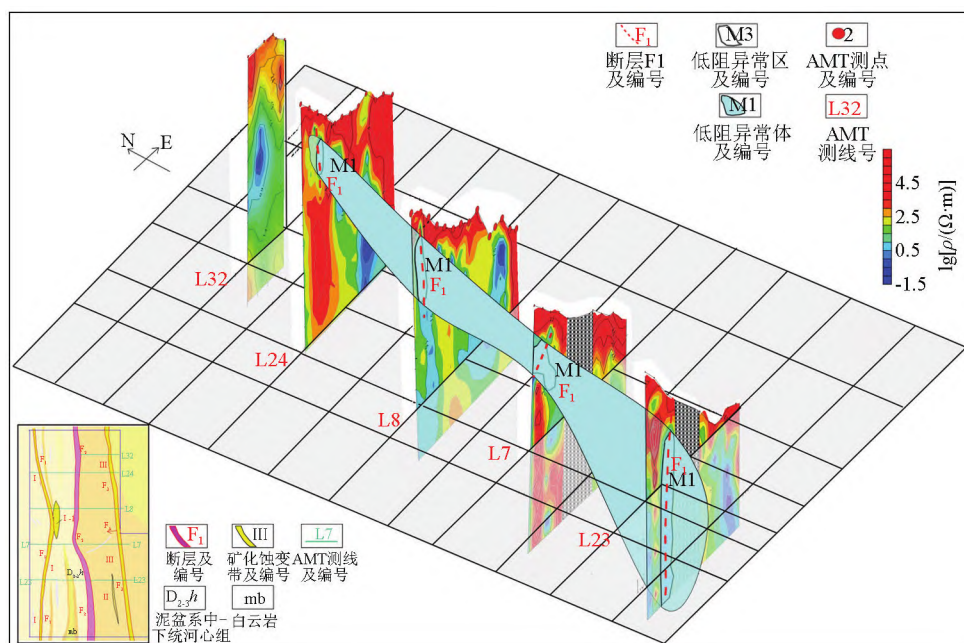


图 8 地质—低阻异常体 M1 立体图

Fig.8 Geology-low resistivity anomaly M1 stereogram

率为 $0.1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ 。该低阻异常体与 F_1 断层破碎带延伸较吻合(图 8),对破碎蚀变带进行揭露,圈出矿化蚀变带 I 号和金铜矿体 I-1 号,说明该异常体为矿质异常。该异常体延伸稳定,规模较大,与矿化蚀变带 I 号吻合,说明矿化蚀变带沿走向和倾向继续延伸,通过进一步揭露和控制,可扩大矿体规模。

3.2 低阻异常体 M2

位于典型矿区中西部,低阻异常体 M2 由 3 个测深剖面(L32、L24 和 L8)的低阻异常区域(图 6、图 7 和图 9)圈定,异常体轴向约 300 m,宽度 15~45 m,

深度 180~260 m,异常区体积约为 $2.8 \times 10^5 \text{ m}^3$,电阻率为 $0.1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ 。该低阻异常体与 F_2 断层破碎带延伸较吻合(图 9),地表未发现炭质或含炭岩性,低电阻异常体推断为金多金属矿物质引起。

3.3 低阻异常体 M3

位于典型矿区南西部,低阻异常体 M3 由 4 个测深剖面(L24、L8、L7 和 L23)的低阻异常区域圈定(图 6、图 7 和图 10),异常体轴向约 420 m,宽度 15~45 m,深度 180~460 m,形态有向深部延伸趋势,异常区体积约为 $5.9 \times 10^5 \text{ m}^3$,出露岩石主要为泥盆

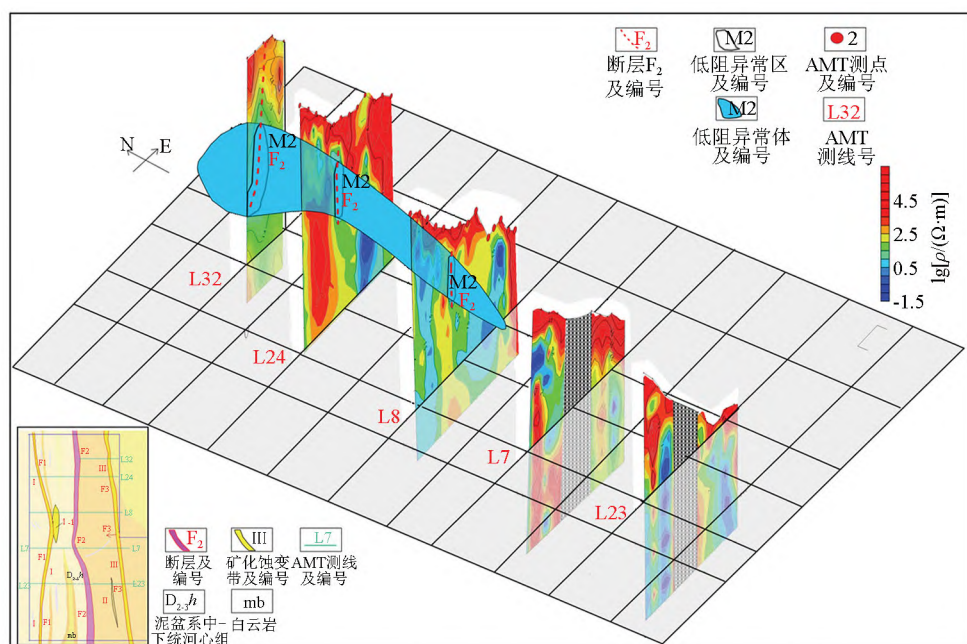
系中—上统河心组 ($D_{2-3}h$) 白云质灰岩和微晶灰岩。该异常与矿区主矿体对应, 重点解剖分析:

1) L24 线剖面上, 低阻异常区编号 M3-1, 异常往东侧未封闭, 异常上部距离地表约 200 m, 形态为长条形, 整体向西倾斜, 倾角约 80° , 延伸长度约 360 m, 宽约 44~60 m, 面积为 $20.5 \times 10^{-3} \text{ km}^2$, 电阻率为 $0.1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ 。

2) L8 线剖面上, 低阻异常区编号为 M3-2, 异常往东侧未封闭, 异常上部距离地表约 45 m, 形态为

长条形, 整体向西倾斜, 倾角约 70° , 延伸长度约 230 m, 宽度 30~40 m, 面积为 $8.9 \times 10^{-3} \text{ km}^2$, 电阻率为 $0.2 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$; 出露岩石为白云质灰岩及炭质板岩。

3) L7 线剖面上, 低阻异常区编号为 M3-3, 异常上部距离地表约 200 m, 形态为长条形, 整体近似直立, 延伸长约 130 m, 宽约 25~40 m, 面积为 $4.4 \times 10^{-3} \text{ km}^2$, 电阻率为 $3.9 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$; 出露岩石为白云质灰岩局部夹变质岩屑砂岩, 经核查见炭质, 推定该



异常由深部金多金属矿质、炭质等低阻物质所引起。

4) L23 线剖面上,低阻异常区编号 M3-4,异常上部距离地表约 120 m,异常形态为长条形,整体向东倾斜,倾角约 78°,延伸长约 300 m,宽 50~75 m,面积为 $1.7 \times 10^{-3} \text{ km}^2$,电阻率为 $0.3 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$;出露岩石为白云质灰岩局部夹变质岩屑砂岩为主;断层 F_3 大范围穿过,岩层产状变化不大,异常未延伸至地表,由断层 F_3 与金矿化带Ⅲ号相关的低阻物质引起。

低阻异常体 M3 与金矿化带Ⅲ号展布吻合:L24 线低阻异常区域,1 910 m 标高处 PD02 坑道见厚大金多金属矿化带Ⅲ号,矿体距离地表约 200 m,为盲矿体,矿体倾向延伸与低阻异常吻合(图 10),表明该异常由金多金属矿物质引起。L24 线低阻异常区域低阻异常沿矿体倾向延伸方向展布较长,说明矿带存在沿倾向继续延伸的趋势,低阻异常体 M3 显示出走向延伸较稳定且走向及倾向上具有延伸趋势,表明金多金属矿化带Ⅲ号具有成矿前景。

4 找矿标志及找矿模型

4.1 找矿标志

石棉大渡河地区金矿带内典型的保坪金矿找矿标志,包含构造破碎带、侵入岩、围岩蚀变和地球

物理异常(表 2)。

表 2 典型矿区找矿标志

Table 2 Typical mining area prospecting signs

标志类型		找矿标志
地质	构造破碎带	矿区内近 SN 走向构造破碎带的主控矿构造
	侵入岩	近 SN 向展布的辉绿岩脉,外接触带是成矿的有利地带
	围岩蚀变	孔雀石化、蓝铜矿化、强褐铁矿化、硅化、矽卡岩化等
地球物理 电阻率异常		音频大地电磁测深反映的低电阻率异常

4.2 地质—地球物理找矿模型

根据石棉大渡河地区区域成矿地质背景及地质条件、区域地球物理特征,依据区内典型保坪金矿成矿背景、找矿标志及地球物理实践成果^[35-38],建立具有区内普遍规律的,符合区内客观实际的地质—地球物理找矿模型(图 11):①赋存层位:区内金矿为碳酸盐岩中的石英脉型金矿或浅变质碎屑岩中石英脉型金矿,属“盖层沉积岩中的金矿”,总体赋存于泥盆系中统(D_2)。②探测目标物:重点是探测赋存金矿地层间岩性间的薄弱带,深大断裂旁侧断裂带中的次级穿层断裂破碎带,浅变质沉积盖层穿层破碎带和层间破碎带、裂隙带、片理带。③目标物及围岩物性特征:矿体及赋存的断层、破碎带、裂

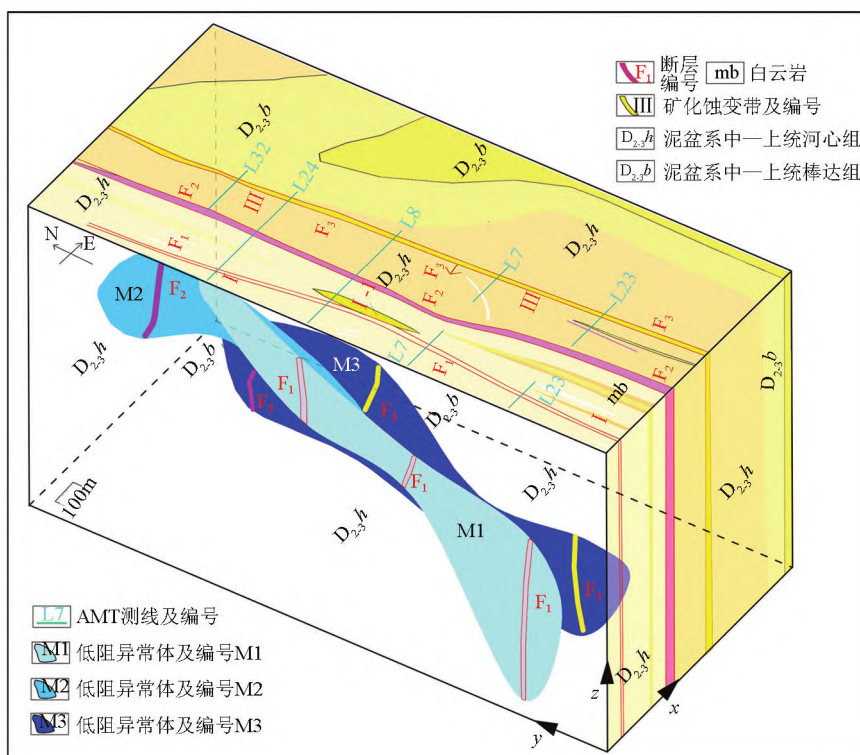


图 11 石棉大渡河地区地质—地球物理找矿模型

Fig.11 Geological and geophysical prospecting model of Dadu River area in Shimian

隙带和片理带为低阻; 围岩为泥盆系中统的碳酸盐岩、浅变质碎屑岩完整岩性为中高阻。④重点成矿区域: 石棉大渡河地区泥盆系中统的断层、破碎带、裂隙带和片理带。

5 结论及讨论

1) 石棉大渡河地区金矿带主要产于泥盆系内部的次级顺层剪切带中, 属于“盖层沉积岩中金矿”。地球物理找矿标志为音频大地电磁测深反映的低电阻率异常。建立地质—地球物理找矿模型: 赋存层位内, 探测赋存金矿地层间岩性间的薄弱带, 深大断裂旁侧断裂带中的次级穿层断裂破碎带等; 矿体及赋存部位表现为低阻, 围岩是完整岩性为中高阻。

2) 保保坪金矿典型矿区开展音频大地电磁测深, 圈出 3 个低阻异常体。低阻异常体 M1 与 F₁ 断层破碎带延伸吻合, 对破碎蚀变带进行揭露, 圈出矿化蚀变带 I 号和金铜矿体 I-1 号。低阻异常体 M3 与金多金属矿化带 III 号展布吻合, 矿体倾向延伸与低阻异常吻合, 表明该异常由金多金属矿化带 III 号中金矿化引起。

3) 通过上述工作, 说明基于音频大地电磁测深的地球物理勘查方法在区内具备有效性和适用性, 建立的地质—地球物理找矿模型, 对石棉大渡河地区的金矿深部勘查具有一定的示范和支撑作用。

致谢: 感谢 20 世纪 70 年代完成 1: 20 万区调石棉幅和荣经幅的地质前辈。

参考文献(References):

- [1] 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 337-358.
Hou Z Q, Yang Z S, Xu W Y et al. Metallogeneses in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 337-358.
- [2] 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 629-651.
Hou Z Q, Qu X M, Yang Z S et al. Metallogeneses in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(6): 629-651.
- [3] 毛景文, 李晓峰, 李厚民, 等. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨[J]. 地质学报, 2005, 79(3): 342-372.
Mao J W, Li X F, Li H M et al. Types and characteristics of endo-genetic metallic deposits in orogenic belts in China and their metallogenic processes[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(3): 342-372.
- [4] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 340

-351.

- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M et al. Metallogeneses in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 340-351.
- [5] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123-144.
Hou Z Q, Song Y C, Li Z et al. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 123-144.
- [6] 冯军, 蒋文, 张征. 新疆维权银铜多金属矿地质—地球物理找矿模式及成矿模型[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 868-876.
Feng J, Jiang W, Zhang Z. Geophysical prospecting mode and metallogenic model of the Weiquan silver-copper polymetallic deposit in Xinjiang[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 868-876.
- [7] 陈大磊, 王润生, 贺春艳, 等. 综合地球物理探测在深部空间结构中的应用——以胶东金矿集区为例[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 70-77.
Chen D L, Wang R S, He C Y et al. Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures: A case study of Jiaodong gold ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 70-77.
- [8] 游越新, 邓居智, 陈辉, 等. 综合物探方法在云南澜沧老厂多金属矿区深部找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 638-647.
You Y X, Deng J Z, Chen H et al. Application of integrated geophysical methods in deep ore prospecting of Laochang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 638-647.
- [9] 虎新军, 陈晓晶, 仵阳, 等. 综合地球物理技术在银川盆地东缘地热研究中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 845-853.
Hu X J, Chen X J, Wu Y et al. Application of comprehensive geophysical exploration in geothermal resources on the eastern margin of Yinchuan Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 845-853.
- [10] 张宝林, 苏艳平, 张国梁, 等. 胶东典型含矿构造岩相带的地质—地球物理信息预测方法与找矿实践[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 85-94.
Zhang B L, Su Y P, Zhang G L et al. Predicting method of typical ore-bearing tectonic lithofacies zones by integrated geological-geophysical information and its prospecting practice in eastern Shandong, China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 85-94.
- [11] 李英康, 高建伟, 韩健, 等. 扬子块体两侧造山带地壳推覆的地球物理证据及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(4): 687-705.
Li Y K, Gao J W, Han J et al. Geophysical evidence for thrusting of crustal materials from orogenic belts over both sides of the Yangtze Block and its geological significance[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2019, 49(4): 687-705.
- [12] 喻翔, 汪硕, 胡英才, 等. 二连盆地北部玄武岩覆盖区电性结构

- 与铀成矿环境研究[J].物探与化探,2022,46(5):1157-1166.
- Yu X,Wang S,Hu Y C,et al.Study on electrical structure and uranium metallogenic environment of basalt-covered area in the northern Erlian Basin[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(5):1157-1166.
- [13] 王卫,陈建国.湖北荆当盆地何家湾地区三维地质地球物理模型研究[J].地质学刊,2017,41(3):432-440.
- Wang W,Chen J G.3D geophysical modelling in Hejiawan area of the Jingmen-Dangyang Basin,Hubei Province[J].Journal of Geology,2017,41(3):432-440.
- [14] 何帅,杨炳南,阮帅,等.三维 AMT 正反演技术对贵州马坪含金刚石岩体探测的精细解释[J].物探与化探,2022,46(3):618-627.
- He S,Yang B N,Ruan S,et al.Fine Interpretation of the exploration results of diamond-bearing rock masses in Maping area,Guizhou using the 3D AMT forward modeling and inversion technologies[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(3):618-627.
- [15] 许志琴,王宗秀,侯立玮.松潘—甘孜造山带构造研究新进展[J].中国地质,1991,18(12):14-16.
- Xu Z Q,Wang Z X,Hou L W.New progress in structural research of Songpan-Ganzi orogenic belt[J].Geology in China,1991,18(12):14-16.
- [16] 李华健,王庆飞,杨林,等.青藏高原碰撞造山背景造山型金矿床:构造背景、地质及地球化学特征[J].岩石学报,2017,33(7):2189-2201.
- Li H J,Wang Q F,Yang L,et al.Orogenic gold deposits formed in Tibetan collisional orogen setting: Geotectonic setting,geological and geochemical features[J].Acta Petrologica Sinica,2017,33(7):2189-2201.
- [17] 邓军,王庆飞,李龚健.复合造山和复合成矿系统:三江特提斯例析[J].岩石学报,2016,32(8):2225-2247.
- Deng J,Wang Q F,Li G J.Superimposed orogeny and composite metallogenic system: Case study from the Sanjiang Tethyan belt,SW China[J].Acta Petrologica Sinica,2016,32(8):2225-2247.
- [18] 骆耀南,俞如龙.西南三江地区造山演化过程及成矿时空分布[J].地球学报,2002,23(5):417-422.
- Luo Y N,Yu R L.Orogenic evolution and metallogenic time-space distribution in Jinshajiang-Lancangjiang-Nujiang Region, Southwest China[J].Acta Geoscientia Sinica,2002,23(5):417-422.
- [19] 滕彦国.田湾金银铜矿带流体成矿的地球化学界面[D].成都:成都理工学院,1999.
- Teng Y G.Geochemical interface of fluid mineralization in tianwan Au-Ag-Cu Belt[D].Chengdu: Chengdu University of Technology,1999.
- [20] 左林.四川大渡河金矿地质构造特征及深部找矿方向研究[J].世界有色金属,2020(13):74-75.
- Zuo L.Study on geological structure characteristics and deep prospecting direction of Daduhe gold mine in Sichuan Province[J].World Nonferrous Metals,2020(13):74-75.
- [21] 朱玉娣,代堰铭,王丽丽,等.松潘—甘孜造山带南缘二叠系变质玄武岩的成因与构造意义[J].地学前缘,2017,24(6):98-109.
- Zhu Y D,Dai Y P,Wang L L,et al.Petrogenesis and tectonic significance of the Permian metabasalts in the southern margin of the Songpan-Garze orogenic belt[J].Earth Science Frontiers,2017,24(6):98-109.
- [22] 秦大军.韧性剪切作用与深源流体演化和金矿化的耦合关系[J].地质地球化学,1997,25(3):58-63.
- Qin D J.The coupled relationships between shear zone and deep-derived fluid and mineralization[J].Geology-Geochemistry,1997,25(3):58-63.
- [23] 应汉龙,骆耀南.四川石棉西部地区金矿床形成时代[J].地质论评,2007,53(2):273-280.
- Ying H L,Luo Y N.The formation age of gold ore deposits in western Shimian,Sichuan[J].Geological Review,2007,53(2):273-280.
- [24] 刘斌,王权锋.四川石棉县薛家崖金矿成矿地质特征及找矿前景分析[J].有色金属工程,2015,5(1):76-80.
- Liu B,Wang Q F.Gold metallogenic geological characteristics and prospect analysis for xuejiaya gold deposit in Shimian of Sichuan[J].Nonferrous Metals Engineering,2015,5(1):76-80.
- [25] 马天祺,张燕,陈翠华,等.四川丹巴独狼沟金矿中金与碲铋矿物的赋存状态及金的富集机制[J].岩石矿物学杂志,2023,42(4):541-554.
- Ma T Q,Zhang Y,Chen C H,et al.The occurrence state of gold and tellurium? bismuth minerals and enrichment mechanism of gold in Dulonggou gold deposit of Danba,Sichuan Province[J].Acta Petrologica et Mineralogica,2023,42(4):541-554.
- [26] 凡韬.四川省丹巴县美河金矿构造期次及找矿方向探讨[J].四川有色金属,2020(1):18-21.
- Fan T.Discussion on tectonic stage and prospecting direction of meihe gold deposit,Danba County,Sichuan Province[J].Sichuan Nonferrous Metals,2020(1):18-21.
- [27] 高玲举,张健,董森.川西高原重磁异常特征与构造背景分析[J].地球物理学报,2015,58(8):2996-3008.
- Gao L J,Zhang J,Dong M.The study of gravity-magnetic anomaly and tectonic background in Sichuan west region[J].Chinese Journal of Geophysics,2015,58(8):2996-3008.
- [28] 闫亚芬,滕吉文,阮小敏,等.龙门山和相邻地域航磁场特征与汶川大地震[J].地球物理学报,2016,59(1):197-214.
- Yan Y F,Teng J W,Ruan X M,et al.Aeromagnetic field characteristics and the Wenchuan earthquakes in the Longmenshan mountains and adjacent areas[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(1):197-214.
- [29] 赵航.川西高原及四川盆地壳幔电性结构研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- Zhao H.Study on electrical structure of crust and mantle in western Sichuan Plateau and Sichuan Basin[D].Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2019.
- [30] 李连海.川西鲜水河断裂带道孚—康定段深部电性结构研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- Li L H.Study on deep electrical structure of Daofu-Kangding section of Xianshuihe fault zone in western Sichuan[D].Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021.
- [31] 王桥,杨剑,夏时斌,等.四川盆地新区新层系页岩气的音频大

- 地电磁探测——以川西南乐山地区须家河组为例[J].地质学报, 2022, 96(2): 699–711.
- Wang Q, Yang J, Xia S B, et al. Audio magnetotelluric detection of shale gas in the new horizon of the new area of Sichuan basin: A case study of the Xujiahe Formation in the Leshan area, southwest Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 699–711.
- [32] 吴旭亮, 李茂. 基于 AMT 的龙首山成矿带西盆地段马路沟断裂带深部发育特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1180–1186.
- Wu X L, Li M. Deep occurrence characteristics of the Malugou fault zone in the Xicha section of the Longshoushan metallogenic belt determined based on AMT[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1180–1186.
- [33] 徐璐平, 朱卫平, 朱宏伟, 等. 南秦岭安康汉中地区岩石物性特征及应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1167–1179.
- Xu L P, Zhu W P, Zhu H W, et al. Physical property characteristics of rocks in Hanzhong and Ankang areas at the southern foot of Qinling Mountains and their application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1167–1179.
- [34] 吴林楠, 陈寿波, 刘洋, 等. 东天山香山铜镍矿“三位一体”地质—地球物理模型及深部预测[J]. 新疆地质, 2021, 39(4): 534–540.
- Wu L N, Chen S B, Liu Y, et al. “Trinity” geological-geophysical model and deep prediction of Xiangshan copper nickel deposit in Eastern Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(4): 534–540.
- [35] 王玉方, 罗霄. 新疆哈密市雅北铁矿地球物理特征及成因分析[J]. 世界有色金属, 2021(10): 161–162.
- Wang Y F, Luo X. Geophysical characteristics and genetic analysis of Yabei iron deposit in Hami, Xinjiang[J]. World Nonferrous Metals, 2021(10): 161–162.
- [36] 李凯春, 杨言辰, 陈天文, 等. 吉林小红石砬子铅锌银矿区综合物探三维建模及矿体定位预测[J]. 世界地质, 2022, 41(4): 737–750.
- Li K C, Yang Y C, Chen T W, et al. 3D modeling of integrated geophysical prospecting and orebody location prediction in Xiaohongshilazi Pb–Zn–Ag mining area, Jilin Province[J]. World Geology, 2022, 41(4): 737–750.
- [37] 余长恒, 郑健, 张旭林, 等. 川南地区页岩气井平台钻前工程物探集成技术[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 99–109.
- Yu C H, Zheng J, Zhang X L, et al. Application of the integrated engineering geophysical exploration technology in the predrilling stage of shale gas well platforms in southern Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 99–109.
- [38] 孟玉明. 内蒙古自治区太仆寺旗金豆子山铅锌矿地质地球物理找矿研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- Meng Y M. Geological and geophysical prospecting of jindouzishan lead-zinc mine in taibus banner, Inner Mongolia autonomous region [D]. Changsha: Central South University, 2009.

AMT-based geological-geophysical prospecting model for the gold ore zone in the Daduhe area, Shimian County, Sichuan Province

YAO Wen, GUO Jun, SUN Chong-Bo, ZHOU Hong-Bing, ZHANG Hong-Chao
(Sichuan Institute of Metal Geological Survey, Chengdu 611730, China)

Abstract: The gold ore zone in the Daduhe area of Shimian County, Sichuan Province, is located in the rare metal-precious metal-non-ferrous polymetal metallogenic belt in the southern segment of the Songpan-Ganzi orogenic belt. It exhibits complex structures and steep terrains, severely restricting prospecting and exploration. Based on the geological settings, conditions, and geophysical characteristics for regional mineralization, this study investigated the typical Luoluoping gold deposit in Shimian by conducting deep geophysical exploration centered on audio-frequency magnetotellurics (AMT). Three low-resistivity anomalies (M1, M2, and M3) were identified, corresponding to the mineralized alteration zone I, the gold mineralization zone III, and the gold-copper ore body, respectively, demonstrating the effectiveness and applicability of geophysical methods for deep prospecting. Combined with geological understanding and engineering verification, this study summarized geological and geophysical prospecting markers for the typical gold deposit, establishing the geological-geophysical prospecting model for the gold ore zone in the study area. Therefore, this study provides technical support for deep prospecting in the study area.

Key words: Shimian; gold ore zone; geophysics; prospecting model

(本文编辑: 王萌)